



# Sobre la distribución de masa de la galaxia Fourcade-Figueroa

J. Saponara<sup>1</sup>, P. Benaglia<sup>1</sup>, B.S. Koribalski<sup>2,3</sup> & P. Kamphuis<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CICPBA-UNLP, Argentina

<sup>2</sup> CSIRO Astronomy & Space Science, Australia Telescope National Facility, Australia

<sup>3</sup> Western Sydney University, Australia

<sup>4</sup> Faculty of Physics and Astronomy, Ruhr-University, Bochum, Alemania

Contacto / jsaponara@iar.unlp.edu.ar

**Resumen** / En este trabajo presentamos resultados preliminares correspondientes al estudio de la galaxia cercana Fourcade-Figueroa (FF;  $D = 6.95$  Mpc), localizada inmediatamente detrás del lóbulo sur de la radiogalaxia Centaurus A (NGC 5128;  $D = 3.8$  Mpc). Al combinar observaciones interferométricas de 21 cm tomadas con el Giant Metrewave Radio Telescope y el Australia Telescope Compact Array, logramos cubos de imágenes de calidad sin precedentes, con una resolución espectral de  $4 \text{ km s}^{-1}$ , un ruido de  $2 \text{ mJy beam}^{-1}$  y una resolución angular de  $20'' \times 20''$ . Del ajuste de un modelo de anillo inclinado a los cubos de datos obtuvimos la curva de rotación de FF y su distribución superficial de HI deproyectada. Utilizando datos del Hubble Space Telescope derivamos la distribución superficial de brillo correspondiente de la galaxia. La curva de rotación y las distribuciones superficiales de brillo y de HI se usaron para construir los modelos de masa total para FF. En esta contribución presentamos los primeros resultados obtenidos para el caso particular de masa estelar mínima, y discutimos lo hallado al considerar los halos de materia oscura de Navarro, Frenk y White y pseudoisotérmico.

**Abstract** / Here we present preliminary results on the nearby Fourcade-Figueroa galaxy (FF;  $D = 6.95$  Mpc), located just behind the southern lobe of the radio galaxy Centaurus A (NGC 5128;  $D = 3.8$  Mpc). By combining 21 cm observations from the Giant Metrewave Radio Telescope and the Australia Telescope Compact Array, we achieved image cubes of unprecedented quality, with a spectral resolution of  $4 \text{ km s}^{-1}$ , an rms noise of  $2 \text{ mJy beam}^{-1}$  and an angular resolution of  $20'' \times 20''$ . From the fitting of an inclined ring model to the data cubes, we obtained the FF rotation curve and its de-projected HI surface distribution. Using data from the Hubble Space Telescope we derived the corresponding surface brightness distribution of the galaxy. The rotation curve and brightness distributions were used to build the mass models for the galaxy. In this contribution we present the first results for the particular case of minimum stellar mass, and discuss what was found when considering the Navarro, Frenk and White and pseudo-isothermal dark matter halos.

**Keywords** / galaxies: general — radio lines: galaxies

## 1. Introducción

La mayoría de las galaxias espirales se agrupan, básicamente, en dos clases: las de tipo temprano, con un bulbo dominante, y las de tipo tardío, con un bulbo pequeño o casi sin bulbo. Adicionalmente, hay algunas galaxias, menos estudiadas, que no tienen bulbo y son ultraplanas o superdelgadas, con un cociente de semiejes mayor (a) a menor (b) alto ( $a/b > 10$ ). La denominación de las mismas como superdelgadas fue acuñada por Goad & Roberts (1979). Algunos años después, Karachentsev et al. (1993) publicaron el *Flat Galaxy Catalog*, y posteriormente una versión actualizada del mismo (Karachentsev et al., 1999). El catálogo contiene galaxias de disco vistas de canto, delgadas, con una relación de semiejes  $a/b > 7$ . Estas galaxias son de bajo brillo superficial, ricas en gas, con un bulbo pequeño o sin un bulbo claramente observado, mínima presencia de polvo (Matthews & Wood, 2001), colores ópticos azules (Dalcanton & Bernstein, 2000), bajas metalicidades (Roennback & Bergvall, 1995), poca actividad de formación estelar y una relación de masa dinámica sobre

masa de hidrógeno neutro ( $M_{\text{dyn}}/M_{\text{HI}}$ ) alta (de Blok & Bosma, 2002). Además, sus curvas de rotación crecen lentamente, similar a lo observado para galaxias enanas. Son abundantes en el universo local y se cree que son sistemas dinámicos poco evolucionados. Por este motivo, este tipo de galaxias permite vislumbrar cómo es la evolución de las galaxias en sus inicios.

Al presente, los modelos cosmológicos no predicen la formación de galaxias con disco dominante, especialmente si no tienen bulbo (Abadi et al., 2003). Es bien sabido que la estructura y el grosor del disco se verán afectados por el medio en el que se encuentran, lo que sugiere que una galaxia de disco debe permanecer aislada para persistir superdelgada (Kautsch, 2009). Sin embargo, estas galaxias de disco puro existen, y se las encuentra tanto aisladas como en grupos (para una revisión, ver Kautsch, 2009). Entonces, el problema de cómo sobrevive una galaxia de disco puro, es quizá la pregunta más relevante que motiva el estudio de las mismas.

En esta contribución presentamos los primeros resultados sobre una de estas galaxias superdelgadas, en

particular en relación a la determinación de la distribución de masa en una geometría tan particular.

## 2. La galaxia Fourcade-Figueroa

La galaxia Fourcade-Figueroa (FF) también es conocida como ESO 270–G017 y fue descubierta en 1970 mediante observaciones en el rango óptico, como un objeto alargado y difuso (Fourcade, 1970). Graham (1978) concluyó que FF es una galaxia de tipo tardío, vista de canto. En la publicación de Dottori & Fourcade (1973), los autores discutieron si la galaxia en cuestión estaría físicamente asociada a la radio galaxia Centaurus A (NGC 5128), ubicada al noroeste de FF. De hecho, hasta el año 2013, se creyó que FF estaba a una distancia similar a NGC 5128 ( $3.8 \pm 0.34$  Mpc, ver Sérsic, 1960), en base a lo cual Colomb et al. (1984) y Thomson (1992) atribuyeron la asimetría observada en el lado suroeste de la galaxia FF al resultado de una probable interacción entre la galaxia FF y NGC 5128. En un trabajo más reciente, Tully et al. (2013) determinaron una nueva distancia utilizando el método del extremo superior de la rama de las gigantes rojas (TRGB, por sus siglas en inglés). Los resultados llevaron a posicionar FF a una distancia mayor a 6.94 Mpc y sin vecinos conocidos. De acuerdo con esta nueva distancia, la galaxia FF se encuentra por detrás de Centaurus A, e inconexa.

Utilizando la distancia TRGB calculamos la magnitud azul integrada de FF, obteniendo  $-17.9$  mag. FF resultó ligeramente más brillante que una galaxia enana, al límite de ser considerada una galaxia de bajo brillo superficial (LSB, por sus siglas en inglés). De imágenes ópticas se deduce que la relación entre los ejes mayor ( $a = 102''$ ) y menor ( $b = 120''$ ) de la galaxia es  $a/b = 8.5$  (Lauberts & Valentijn, 1989). Este valor, junto con otras propiedades globales de la galaxia, listadas en la Tabla 1, nos permiten considerarla como una galaxia superdelgada.

Tabla 1: Propiedades de la galaxia Fourcade-Figueroa.

Tipo morfológico	SB(s)m	(1)
Ascensión recta (J2000) [h,m,s]	13:34:47.3	
Declinación (J2000) [ $^{\circ}$ ' '']	$-45:32:51$	
Distancia [Mpc]	6.9	(2)
Magnitud en el azul, $m_B$	11.7	(3)
Diámetro $D_{B25}$ [kpc]	15.12	(3)
Diámetro $D_{HI}$ [kpc]	40.4†	
Absorción en el azul $A_B$	0.48	(4)
Magnitud absoluta en el azul $M_B$ [mag]	-18	
Luminosidad en el azul $L_B$ [ $10^9 L_{\odot,B}$ ]	2.4	
Ángulo de posición, PA [ $^{\circ}$ ]	118	(3)
Inclinación, $i$ [ $^{\circ}$ ]	83	(3)

Referencias: (1) de Vaucouleurs et al. (1991), (2) Tully et al. (2013), (3) ESO LV (Lauberts & Valentijn, 1989), (4) Schlegel et al. (1998). †: corresponde al diámetro angular medido de  $20'$ , a la distancia adoptada.

## 3. Datos de HI

En esta investigación se utilizaron datos del *Australia Telescope Online Archive*\* y observaciones dedicadas tomadas con el *Giant Metrewave Radio Telescope* (proyecto 28.069) durante 2015 y 2016, configuradas de forma de lograr una resolución en velocidad de  $4 \text{ km s}^{-1}$ . A 1.4 GHz, los campos de visión de los instrumentos ATCA y GMRT tienen un diámetro de  $33'$  y  $26.6'$ , respectivamente. Esto nos permitió observar toda la galaxia en un solo apuntamiento. Los juegos de datos fueron reducidos separadamente mediante las rutinas estándar para cada caso, y luego combinados en cubos ( $RA$ ,  $Dec$ ,  $v$ ) de imágenes de HI finales con una resolución angular de  $20''$  y un ruido (rms) de  $2 \text{ mJy beam}^{-1}$ , cubriendo un intervalo total de  $\pm 500 \text{ km s}^{-1}$  (la velocidad baricéntrica de FF es  $\approx 830 \text{ km s}^{-1}$ ). La extensión espacial de la galaxia es  $\approx 60$  veces la resolución angular alcanzada.

## 4. Modelado de la distribución de masa

A fin de modelar la distribución de masa total es necesario realizar una serie de determinaciones previas sobre la componente estelar y la componente gaseosa de la galaxia. Primeramente, es preciso conocer la distribución superficial de brillo de la componente estelar, ya que a partir de esta podemos modelar la distribución de la masa de la componente estelar. Para obtener esta distribución fue necesario realizar los siguientes pasos sobre el cubo de HI: aplicar la rutina GALFIT (Peng et al., 2002), y derivar la curva de rotación a partir de las rutinas FAT, TIRIFIC (Kamphuis et al., 2015; Józsa et al., 2012) y *Source Finder Application* (SOFIA, Serra et al., 2015), lo cual permitió estimar algunos parámetros iniciales además de la distribución superficial de HI.

Para comprobar la validez de los ajustes llevados a cabo con FAT y TIRIFIC se realizaron comparaciones entre los datos y los modelos, que incluyeron el cotejar los mapas de canales, los campos de velocidades y el diagrama posición-velocidad ( $pv$ ).

Específicamente para derivar la curva de rotación, hicimos uso del programa ROTMAS perteneciente al paquete GIPSY (van der Hulst et al., 1992) que permite el modelado interactivo de curvas de rotación, con opciones para la adición de la contribución del halo de materia oscura. Debido a que la galaxia FF no tiene un bulbo, la velocidad de rotación neta  $V(R)$  en un radio  $R$ , se obtiene sumando en cuadratura la velocidad de rotación debida al potencial gravitatorio de las estrellas en el disco, el gas y los componentes de la materia oscura:

$$V(R)^2 = f_* v_*(R)^2 + f_{\text{gas}} v_{\text{gas}}(R)^2 + v_{DM}(R)^2, \quad (1)$$

donde  $f_*$  y  $f_{\text{gas}}$  son factores de escala para la masa de la componente estelar y gaseosa, respectivamente.

El modelado de la distribución de masa se llevó a cabo asumiendo un disco mínimo; este modelo tiene en cuenta la contribución del gas (HI + He) y de la materia oscura a la curva de rotación. A su vez, consideramos los modelos de halo de materia oscura pseudoisotérmicos (ISO, por sus siglas en inglés, Begeman et al., 1991)

\*<https://atoa.atnf.csiro.au/>

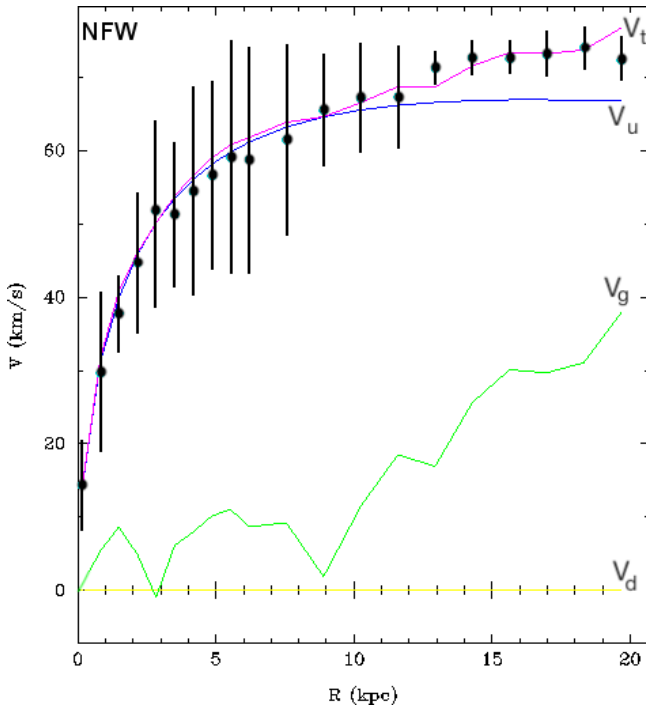


Figura 1: Curva de rotación de HI de la galaxia Fourcade-Figueroa utilizando un modelo de masa de halo tipo NFW para un disco mínimo de HI + He. Los puntos negros trazan la curva de rotación con sus respectivos errores, la línea amarilla indica velocidad de la curva de rotación contribuida por el disco estelar ( $V_d$ , nula, en el caso aquí estudiado), la línea verde muestra lo que aporta el disco de gas ( $V_g$ ), la línea azul es la componente en velocidad debido al halo de materia oscura ( $V_u$ ), y en color rosa se representa el modelo que mejor se ajusta para la curva de rotación ( $V_t$ )

y el de Navarro, Frenk & White (NFW) Navarro et al. (1996). Los ajustes obtenidos mostraron ligeras diferencias, aunque el error propio de las observaciones no permitió discriminar entre ellos. En la Fig. 1 presentamos las distintas componentes obtenidas para uno de ellos.

## 5. Primeras conclusiones y trabajo a futuro

Una de las preguntas que todavía sigue sin ser respondida es cuál es el halo de materia oscura que mejor representa la distribución total de masa en las galaxias superdelgadas. Para contribuir a su respuesta, comenzamos este trabajo de investigación modelando la distribución total de masa, asumiendo un disco mínimo más la contribución del gas (HI+He) y considerando los modelos de halo de materia oscura ISO y NFW. Encontramos que el modelo con un halo ISO que mejor ajusta da como resultado una densidad central  $\rho_0 = 74 \pm 20 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-3}$ , y el

radio del núcleo  $R = 1.1 \pm 0.1 \text{ kpc}$  ( $\chi^2 = 0.54$ ), mientras que con el modelo considerando el halo NFW obtuvimos un parámetro de concentración  $c = 1.4 \pm 0.1$  y un radio característico  $R_{200} = 44.8 \pm 0.8 \text{ kpc}$  ( $\chi^2 = 0.30$ ). Nótese que cada modelo arroja distintos parámetros, no comparables de manera directa entre ellos. En ambos casos se verifica  $\chi^2 < 1$ , debido a la sobreestimación de los errores en la velocidad de rotación.

A fin de comprender mejor el papel desempeñado por el halo de materia oscura en la estructura superdelgada de FF, el próximo paso es extender nuestro estudio considerando los casos de modelado de disco máximo (potencial gravitacional dominado por la componente estelar), disco mínimo (solamente considerando la presencia de la materia oscura) y la estimación del cociente masa-luminosidad estelar  $f_*$  que más se adecúe a la galaxia bajo estudio.

## Referencias

- Abadi M.G., et al., 2003, ApJ, 591, 499  
 Begeman K.G., Broeils A.H., Sanders R.H., 1991, MNRAS, 249, 523  
 Colomb F.R., Loiseau N., Testori J.C., 1984, Astrophys. Lett., 24, 139  
 Dalcanton J.J., Bernstein R.A., 2000, AJ, 120, 203  
 de Blok W.J.G., Bosma A., 2002, A&A, 385, 816  
 de Vaucouleurs G., et al., 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, 1, vol. 3, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York  
 Dottori H.A., Fourcade C.R., 1973, A&A, 23, 405  
 Fourcade C., 1970, BAAA, 16, 10  
 Goad J.W., Roberts M.S., 1979, *Bulletin of the American Astronomical Society*, vol. 11, 668  
 Graham C., 1978, PASP, 90, 273  
 Józsa G.I.G., et al., 2012, TiRiFiC: Tilted Ring Fitting Code  
 Kamphuis P., et al., 2015, FAT: Fully Automated TiRiFiC  
 Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Parnovskij S.L., 1993, Astron. Nachr., 314, 97  
 Karachentsev I.D., et al., 1999, Bulletin of SAO RAS, 47, 5  
 Kautsch S.J., 2009, PASP, 121, 1297  
 Lauberts A., Valentijn E.A., 1989, *The surface photometry catalogue of the ESO-Uppsala galaxies*  
 Matthews L.D., Wood K., 2001, ApJ, 548, 150  
 Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M., 1996, ApJ, 462, 563  
 Peng C.Y., et al., 2002, AJ, 124, 266  
 Roennback J., Bergvall N., 1995, A&A, 302, 353  
 Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M., 1998, ApJ, 500, 525  
 Serra P., et al., 2015, MNRAS, 448, 1922  
 Sérsic J.L., 1960, ZA, 51, 64  
 Thomson R.C., 1992, MNRAS, 257, 689  
 Tully R.B., et al., 2013, AJ, 146, 86  
 van der Hulst J.M., et al., 1992, D.M. Worrall, C. Biemesderfer, J. Barnes (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 25, 131